

文章编号:1673-9469(2021)01-0069-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.011

1990—2015年宁波市热岛效应特征与人口资源环境分析

谭志宁¹, 席素亭^{2*}

(1. 广西壮族自治区城乡规划设计院, 广西南宁 530022; 2. 河北工程大学 建筑与艺术学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 针对目前城市中心越来越明显的城市热岛效应, 基于 Landsat 系列数据和 MODIS 遥感数据, 以宁波市中心城区为研究区域, 运用地理信息系统技术和 Pearson 相关性分析方法, 进行地表温度与其他因素的长时间序列的相关性变化分析。结果表明: 1990—2015 年间, 宁波市中心城区热岛效应变化显著; 其地表温度与 NDVI 呈负相关性, 与 NDBI 呈正相关性; 地表温度与 GDP 呈正相关性, 并在 2010 年达到最大值; 人口规模与城乡之间的差距不会直接导致城市热岛效应, 政府的环境政策是城市热岛的主要影响因素。根据区域所处的发展水平不同, 政府环境保护态度、人口规模发展与城乡差异存在复杂的影响关系。研究表明基于单窗算法的地表温度反演技术分析城市热岛效应变化的驱动因素具有一定可行性。

关键词: 热岛效应; 资源环境; 地表温度反演; NDVI; NDBI; 社会经济因素

中图分类号: PP223

文献标识码: A

Analysis on the Evolution of Heat Island Effect and Its Influencing Factors in Ningbo Central City from 1990 to 2015

TAN Zhining¹, XI Suting^{2*}

(1. Guangxi Urban-rural Planning Design Institute, Nanning, Guangxi 530022, China;

2. School of Architecture and Art, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, China)

Abstract: With the development of urban modernization, urban heat island effect has increasingly intensified its influence on human health, climate, resources and environment, which has become a huge environmental problem facing urban development today. In view of the increasingly obvious urban heat island effect in the urban center, based on Landsat series data and MODIS remote sensing data, this study took the downtown area of Ningbo as the study area, and applied GIS technology and Pearson correlation analysis method to analyze the correlation change between the surface temperature and other factors in the long time series. The results show that from 1990 to 2015, the heat island effect changed significantly in the downtown area of Ningbo. The surface temperature is negatively correlated with NDVI and positively correlated with NDBI. The surface temperature is positively correlated with GDP, reaching its maximum value in 2010. Population size and the gap between rural and urban areas will not directly lead to the urban heat island effect. The study shows that the surface temperature inversion technology based on the single window algorithm analysis the driving factors of urban heat island effect change has certain feasibility. This study can alleviate the planning of Ningbo downtown area benefit of heat island advice, in order to alleviate the regional environmental change.

Key words: heat island effect; resources and environment; surface temperature inversion; NDVI; NDBI; socioeconomic factor

收稿日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41901151)

作者简介: 谭志宁(1981-), 男, 广西南宁人, 建筑学硕士, 高级建筑师、高级城市规划师、国家注册城乡规划师, 主要从事建筑理论与设计、城市规划与设计、风景园林规划设计等研究。

* 通讯作者: 席素亭(1989-), 女, 河北邯郸人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为城市规划与设计、生态城市、风景园林规划设计。

据国家统计局统计截止到2019年我国的城市化率已达到60.60%,快速的城市化进程对地球环境造成很多负面的影响,远远超出了其所在的物理边界,从《京都协议书》到《哥本哈根议定书》,再到2015年我国国家领导人赴巴黎参加世界气候大会,世界各国对全球气候、生态的变化都密切关注,人类赖以生存的人-地-气生态平衡系统,正逐渐失去其原有的平衡,而城市热岛效应就是生态平衡系统中的重要因素^[1]。热岛效应是指当城市发展达到一定程度,城区温度明显高于郊区,形成类似高温孤岛的现象^[2]。在气候变暖背景下,城市热岛和天气事件联系越来越紧密:城市热岛与热浪的协同作用加剧了城市恶劣的微气象条件,对城市生态环境、人类健康和环境质量都带来极大威胁与挑战^[3]。城市热岛效应已成为城市发展进程中普遍面临的环境问题,因此对其深入研究意义重大。1972年Rao提出用热红外监测地表热岛之后^[4],地表温度(Land Surface Temperature, LST)被广泛用于城市热岛的研究,遥感技术的发展为地表温度的全面监测提供手段,热红外监测地表热岛也有利于从宏观角度把握其变化规律。获取近地面的地表温度最直接和准确的方法是现场监测,但是由于地面监测站点较少且建设费用高,无法进行长时间连续大范围监测。随着卫星数据的时空分辨率日益提高,地表温度反演对城市热岛的长时间序列监测受到人们的广泛关注。

目前对热岛效应的研究主要在于热岛效应时空演变^[5-6],热岛效应影响因素分析^[7-8],城市热岛的生态效应^[9-10]以及热岛效应的预测评估^[11-12]。历华基于4个季节的MODIS影像计算长株潭地区的地表温度,在对归一化建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)研究中发现,NDBI是城市热岛研究的有效指标^[13],李学敏对襄阳市热岛效应演变进行分析,基于剖面分析和多元回归,得出植被覆盖对城市热岛的影响大于建筑密度^[14]。目前研究较少从人口、GDP等社会经济因素分析城市热岛效应的时空演变。但实际上由于人类的强干预作用,人类的经济活动对于环境的影响远大于自然作用,是导致环境质量下降的主要因素^[15]。因此探究社会经济因素与温度关系,是研究人口资源环境的新课题。

本文主要选取了宁波市在六个时间段的LST

数据,采用单窗算法进行地表温度反演LST数据,利用MODIS数据进行验证,运用地理信息系统空间分析技术、Pearson相关性分析方法,分析宁波市中心城区热岛效应的时空特征演变特征及其与NDVI、NDBI、人口规模和GDP产值的相关性,明确各社会经济因子对城市热岛空间规模、地表温度变化的影响,为制定缓解宁波市热岛效应的政策措施提供可靠理论依据以及合理建议,以期缓解该区域环境变化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁波市地处我国海岸线中段,长江三角洲南翼,处于东经120°55′至122°16′,北纬28°51′至30°33′的范围。宁波市不仅仅是东南沿海重要的港口城市,长江三角洲南翼经济中心,也是环杭州湾大湾区的重要组成部分(图1)。本文选取宁波市中心城区为研究区域,总面积为2437.59 hm²,宁波市中心城区布局呈“一主两副,双心三带”的空间结构。一主即三江片,两副即北仑片和镇海片;双心即三江口中心和东部新城中心;三带即余姚江、奉化江、甬江形成的三条滨江生活带,外围形成慈城、东钱湖、东部滨海、九龙湖、澥浦等组团。到2020年宁波市中心城区人口规模达到395万,建设用地规模达到420 hm²,随着城市规模的不断扩大,热岛效应受到人们的广泛关注。如,姚一舟等人利用Landsat卫星影像反演了宁波市1995、2002、2009年的不透水面、植被、水体、地面温度等主要地表参数,发现14年间研究区域城市热岛范围明显扩大,热岛效应逐渐加强,并且研究区内8个方向上出现了10个新的热岛^[16];丁焯毅等人利用1961—2005年城郊两气象站气温资料,分析出宁波市的城市热岛效应呈逐年增强的趋势,秋冬季的热岛强度较春夏季强,热岛效应具有较明显的日变化,并且“夜热岛”强于“日热岛”^[17]。

1.2 数据来源

本研究采用的温度反演数据为1990年8月14日、1995年7月3日、2000年8月2日和2005年7月28日的Landsat 5 TM数据、2010年8月29日和2015年8月24日Landsat 8 OLI/TIRS数据,来自地理空间数据云平台,行列号为118/39(表1)。本研究主要选取B6热红外波段进行单窗算法温度反演,研究区内图像质量良好,云量极少,

宁波市中心城区

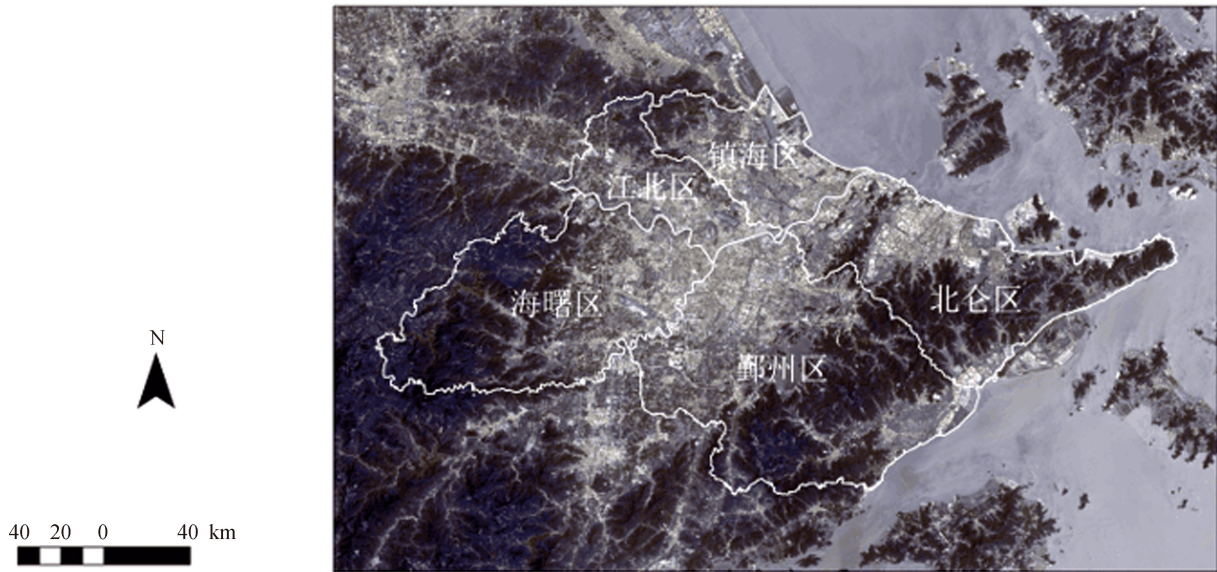


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

地面特征清晰。温度反演后利用 MODLT1D 中国 1 km 地表温度产品对 2000、2005、2010 和 2015 年地表温度反演结果进行验证,由于 MODIS 地表温度存在较多空值,基于最大值合成法将相邻三天的地表温度数据进行合成。进一步从 NDVI、ND-BI、人口和 GDP 对热岛效应的变化进行分析,数据采用中国人口、GDP 空间分布公里网格数据集,来自中国科学院资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>)。

表 1 数据来源
Tab. 1 Data sources

数据来源	时间
Landsat 5 TM	1990、1995、2000、2005
Landsat 8 OLI/T	2010、2015
MODLT1D 中国 1 km 地表温度产品	2000、2005、2010、2015
中国人口空间分布公里网格数据集	1990、1995、2000、2005、2010、2015
中国 GDP 空间分布公里网格数据集	1995、2000、2005、2010、2015

1.3 研究方法

本研究采用覃志豪等的单窗算法^[18]进行地表温度反演,该算法针对 Landsat TM/ETM+的热红外波段数据提出,后胡德勇等人根据 Landsat8 数据特征进行改进^[19],具有较高的反演精度,计算公式如下:

$$T_s = [a_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + (b_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + C_{10} + D_{10})] T_{10}$$

$$(1)$$

$$C_{10} = \tau_{10} \varepsilon_{10} \quad (2)$$

$$D_{10} = (1 - \tau_{10}) [1 + (1 - \varepsilon_{10}) \tau_{10}] \quad (3)$$

式中: T_s 为地表温度 (K); T_{10} 为卫星传感器探测到的像元亮度温度 (K); 则 $a_{10} = -67.9542$, $b_{10} = 0.45987$ ^[20]; τ_{10} 和 ε_{10} 分别指大气透射率和地表比辐射率,地表比辐射率参考覃志豪算法。大气透射率可在 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 上根据影像的成像时间和中心经纬度查询,由于 2000 年之前的大气透射率无法查询,1990 年和 1995 年遥感数据反演地表温度采用 2000 年 8 月 2 日的大气透射率。

1.4 热岛效应指标

为比较不同时相的宁波市中心城区热岛效应强度,将宁波市中心城区地表温度按照标准差法进行划分,将地表温度较高的四级定义为极强热岛、中强热岛、次强热岛和弱热岛(表 2), T_{mean} 表示平均地表温度, T_{sd} 表示地表温度的标准差。

表 2 热岛类型划分

Tab. 2 Classification of heat island types

热岛类型	范围
弱热岛	$T_{mean} - 0.5T_{sd} \sim T_{mean} + 0.5T_{sd}$
次强热岛	$T_{mean} + 0.5T_{sd} \sim T_{mean} + 1.5T_{sd}$
中强热岛	$T_{mean} + 1.5T_{sd} \sim T_{mean} + 2.5T_{sd}$
极强热岛	$T_{mean} + 2.5T_{sd} \sim T_{mean} + 3.5T_{sd}$

1.5 归一化植被指数提取

归一化植被指数 NDVI 是研究热岛效应驱动因素的常见参数。目前国内外相关研究较多集中在 NDVI 时序变化与其它生态因子相关性的研究,而这些生态因子主要是气候因子,如降水、温度等^[21]。NDVI 具有消除部分辐射误差的特点,可用于检测植被生长状况,其公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4)$$

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 是 Landsat 数据的近红外波段和红外波段的表面反射率,NDVI 越高表明区域内植被覆盖度越高、生长状况越好。

归一化建筑指数 NDBI 源于对归一化植被指数 NDVI 的深入分析,其可以用来表征城镇用地的密集程度,计算公式如下:

$$NDBI = \frac{\rho_{MIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{MIR} + \rho_{NIR}} \quad (5)$$

式中, ρ_{MIR} 和 ρ_{NIR} 为 Landsat TM 数据的中红外波段和近红外波段的表面反射率, Landsat8 OLI/TIRS 的 NDBI 通过 SWIR1 和 NIR 波段计算。NDBI 越高表明区域内建筑物用地比例越高,建筑分布越密集。

2 结果与讨论

2.1 温度反演结果及验证

1990—2015 年宁波市中心城区地表温度反演结果如图 2 所示,研究表明 MODIS LST 数据与实际温度差小于 1℃^[22],随机选取宁波市中心城区内的样本点对 2000、2005、2010 和 2015 年地表温度反演结果进行验证(图 3、表 3),地表温度反演 LST 和 MODIS LST 为显著正相关, R^2 最小为 0.68,拟合优度较好,反演结果与真实温度具有良好的一致性, RMSE 和绝对误差结果较小,地表温度反演结果良好,对城市发展研究具有一定价值。

2.2 热岛效应时空变化特征

通过计算得到宁波市中心城区 1990—2015 年 6 个不同时期地表温度反演结果,根据标准差法将其划分为极强热岛、中强热岛、次强热岛和弱热岛(图 4)。1990—2015 年宁波市中心城区热岛效应变化显著,各类型热岛面积(hm^2)如表 4 所示。1990—1995 年,中强热岛面积从 86.43 hm^2 增加到 109.95 hm^2 ,极强热岛面积从 73.49 hm^2 增加到

83.31 hm^2 ,城市热岛聚集在三江口中心逐渐向西部扩散;1995 到 2000 年次强热岛从 323.94 hm^2 增加到 449.86 hm^2 ,中强热岛从 109.95 hm^2 增加到 221.16 hm^2 ,增长 100.01%,但极强热岛下降明显,从 83.31 hm^2 减少到 6.74 hm^2 ,主要原因是宁波市中心城区发展迅速,城市热岛逐渐从单中心发展到多中心,热岛效应普遍上升,各地区之间热岛差异减少;2000—2005 年极强热岛从 6.74 hm^2 增加到 24.22 hm^2 ,中强热岛也有所增加,热岛效应粗具规模;2005—2010 年热岛面积未发生较大变化,主要原因是宁波从“增量发展”逐步走向“存量发展”,从单一的注重“增量市场”到逐步关注“存量市场”。在 2005—2010 年,宁波市中心城区扩张速度减缓,因此热岛效应有所缓和。随着城市的发展,热岛斑块会逐渐由低级向高级转变,宁波市中心城区在三江口周边、甬江口两岸和经济技术开发区形成了三大高温片区^[23]。2010—2015 年热岛面积基本保持不变,热岛效应仍不可忽视。总而言之,1990—2015 年宁波市中心城区热岛效应经历了由单中心走向多中心、高速发展到缓慢增长的历程。

2.3 温度变化特征与各因素的相关性

2.3.1 温度与 NDVI、NDBI 的相关性

宁波市中心城区地表温度与 NDVI 呈负相关性,与 NDBI 呈正相关性(表 5)。从 1990—2017 年平均 LST、平均 NDVI 和平均 NDBI 变化(图 5)来看,从宏观上分析,平均 NDVI 变化趋势与平均 LST 基本相同,这表明了城市植被覆盖率与城市热岛效应之间联系紧密。1995—2000 年平均 NDVI 变化幅度最大,下降约 35.71%;1990—2000 年平均 LST 与 NDVI 相关性不强,在 2005 年之后,NDVI 绝对值增大且大于 0.5,说明植被对于热岛效应的缓解作用逐渐增强。

1990—2005 年平均 NDBI 上升约 75%,2005—2010 年平均 NDBI 迅速下降,宁波市城市建设用地分布从密集走向疏散,2010—2015 年平均 NDBI 变化较少。原因可能为,1990—1995 年宁波市中心城区发展迅速,热岛效应加剧,2000 年突如其来的非典疫情大大减少了人类活动,减少温室气体的排放,缓解了热岛效应,而持续的高温干旱使得植被的活动减少,因此平均 NDVI 值较小,2000—2005 年城乡发展迅速,区域统筹发展格局加快发展,热岛效应加剧。

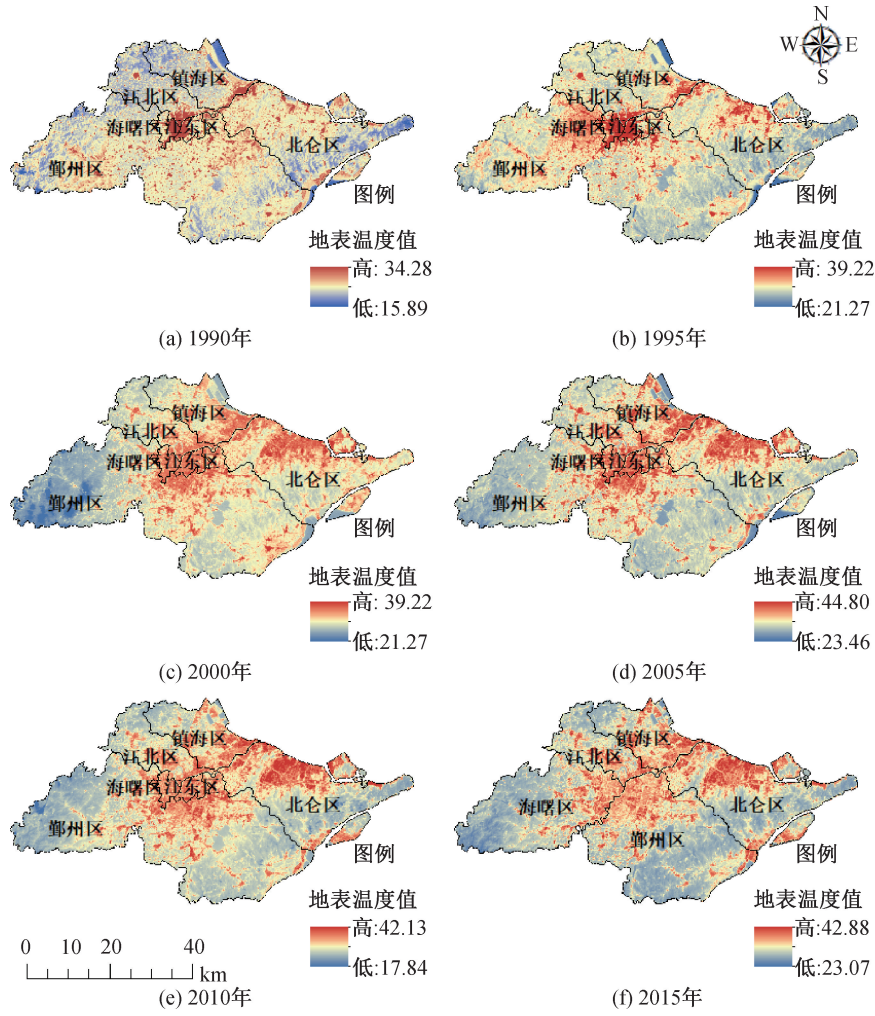


图 2 1990—2015 年宁波市中心城区地表温度

Fig. 2 Land surface temperature of Ningbo central urban area from 1990 to 2015

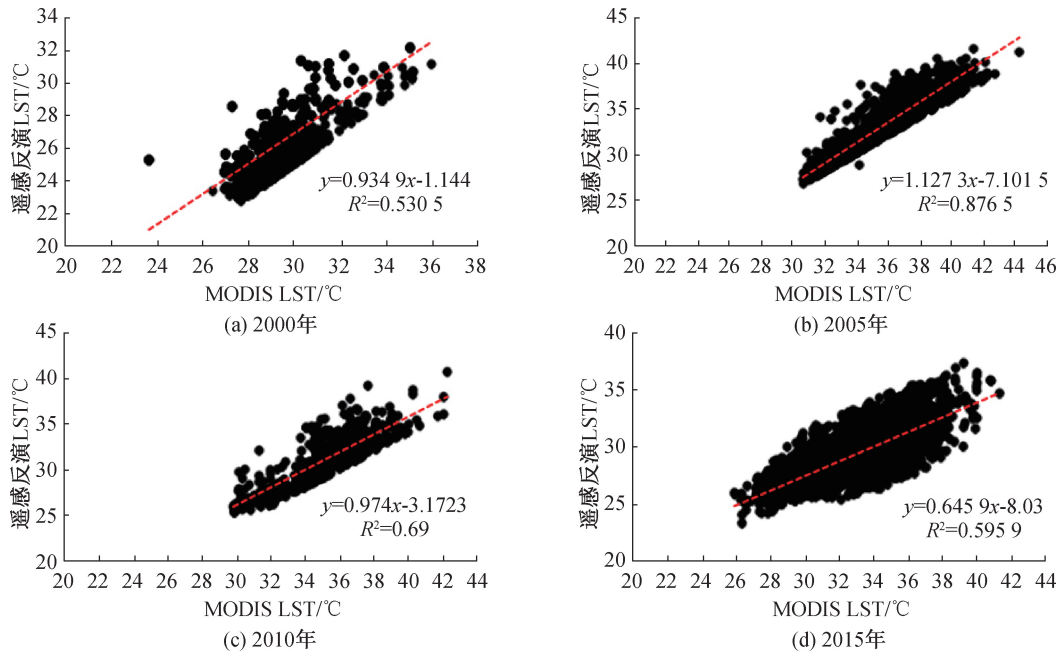


图 3 遥感反演地表温度和 MODIS LST 散点图

Fig. 3 Remote sensing inversion of land surface temperature and MODIS LST scatter map

表3 2000、2005、2010、2015 地表温度反演验证

Tab.3 Validation of land surface temperature inversion in 2000, 2005, 2010 and 2015

日期	相关系数	R ²	RMSE (均方根误差)	BIAS (绝对误差)	样本 点数
2000-08-04	0.534**	0.53	4.58	3.10	1 136
2005-07-28	0.747**	0.86	4.09	2.68	1 259
2010-08-29	0.553**	0.69	5.17	2.79	1 289
2015-08-24	0.700**	0.87	5.08	2.07	1 314

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表4 宁波市 1990、1995、2000、2005、2010、2015 热岛面积

Tab.4 heat island area in 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015 of Ningbo

时间	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
弱热岛	1 363.29	1 199.66	1 076.29	902.62	825.72	765.19
次强热岛	318.22	323.94	449.86	345.45	444.66	456.23
中强热岛	86.43	109.95	221.16	269.41	223.27	226.59
极强热岛	73.49	83.31	6.74	24.22	28.32	26.71

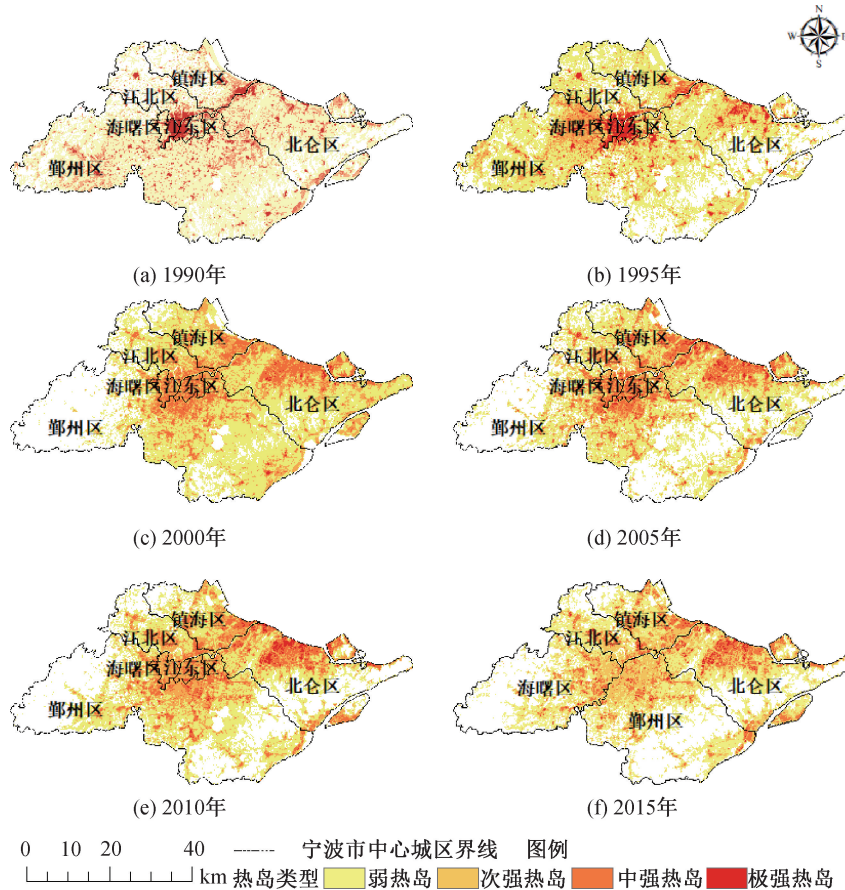


图4 1990—2015年宁波市中心城区热岛效应演变

Fig. 4 Evolution of the heat island effect in the central urban area of Ningbo from 1990 to 2015

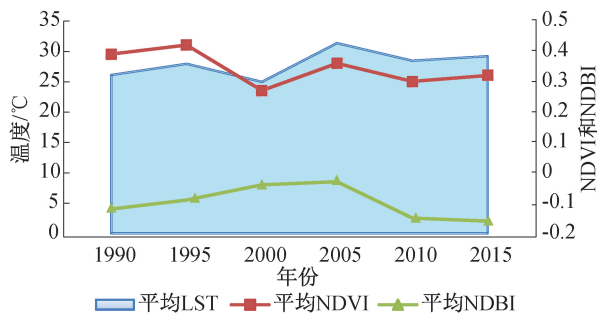


图5 1990—2017年平均LST、平均NDVI和平均NDBI变化

Fig. 5 Changes of mean LST, mean NDVI and mean NDBI from 1990 to 2015

表5 地表温度与NDVI、NDBI相关性

Tab.5 Correlation between surface temperature and NDVI, NDBI

指数	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
NDVI	-0.26	-0.33	-0.38	-0.51	-0.60	-0.65
NDBI	0.55	0.66	0.58	0.78	0.70	0.73

2005—2010年加快区域统筹发展,不少外围组团、卫星城的建设缓解了中心城区的压力,中心城区热岛效应减缓,2010—2015年宁波市注重绿色空间的营造,NDVI增加,对热岛效应起到了很好的缓解作用。NDBI、NDVI与热岛效应联系较为

密切,城市发展中城市规模应当合理,避免“摊大饼”式地扩张,当城市发展到一定规模时,城市绿色建设是缓解热岛效应的有效途径。

2.3.2 温度与人口规模的相关性

1990—2015 年人口空间分布如图 6 所示,将 1990、2000、2005、2015 年 LST 数据和 1990、2000、2005、2015 年人口公里网格进行相关分析,分析得出地表温度与人口呈正相关(表 6)且其相关性在 2004 年为最大值。由图 7 可知,在 1990—2005 年,宁波市中心城区人口呈现波动变化。通过调查分析后发现,人口在这段时间内发生波动的主要原因是宁波市中心城区人口在当时处于流出状态,一部分宁波人选择外出经商,同时一部分外来务工人员涌入,但人口规模最终并未发生很大变化。除此之外,这一时期宁波市中心城区注重港口建设,镇海区和北仑区的人口明显增多,由此可见,人口主要增长区域与地表温度变化是相一致的。2005 年后,随着宁波市综合实力的不断提高,人口有了较大增长,增长的人口主要来自两个部

分:一部分是吸引到宁波发展、工作的优秀人才,一部分是外出经商的宁波人回乡建设。2005—2010 年的最大 1 km 网格人口与 2005 年前相比增长到将近 5 倍,可以得出随着时间的推移,人口区域差异在不断增大。2010—2015 年,虽然人口持续增长,城乡差距仍旧显著,但是人为活动对热岛效应的影响减弱,主要原因是由于宁波市在不断推进新型城市化的同时开始注重生态保护。人口的快速增加和城乡的差距并不会直接导致城市热岛效应,建议政府在城市化初期合理控制人口规模,并在城市化水平的提高过程中,注重资源和环境的保护,由此可以在缩小城乡差异的同时既能为城市发展注入活力,又能为城市建设营造良好的生态环境。

2.3.3 温度与 GDP 相关性

1995—2015 年宁波市中心城区 GDP 空间分布如图 8 所示,计算 1998、2004、2013、2017 年遥感反演 LST 数据和 2000、2005、2010、2015 年 GDP 的相关性,其相关性在 2010 年达到最大,为 0.62 (表 7)。

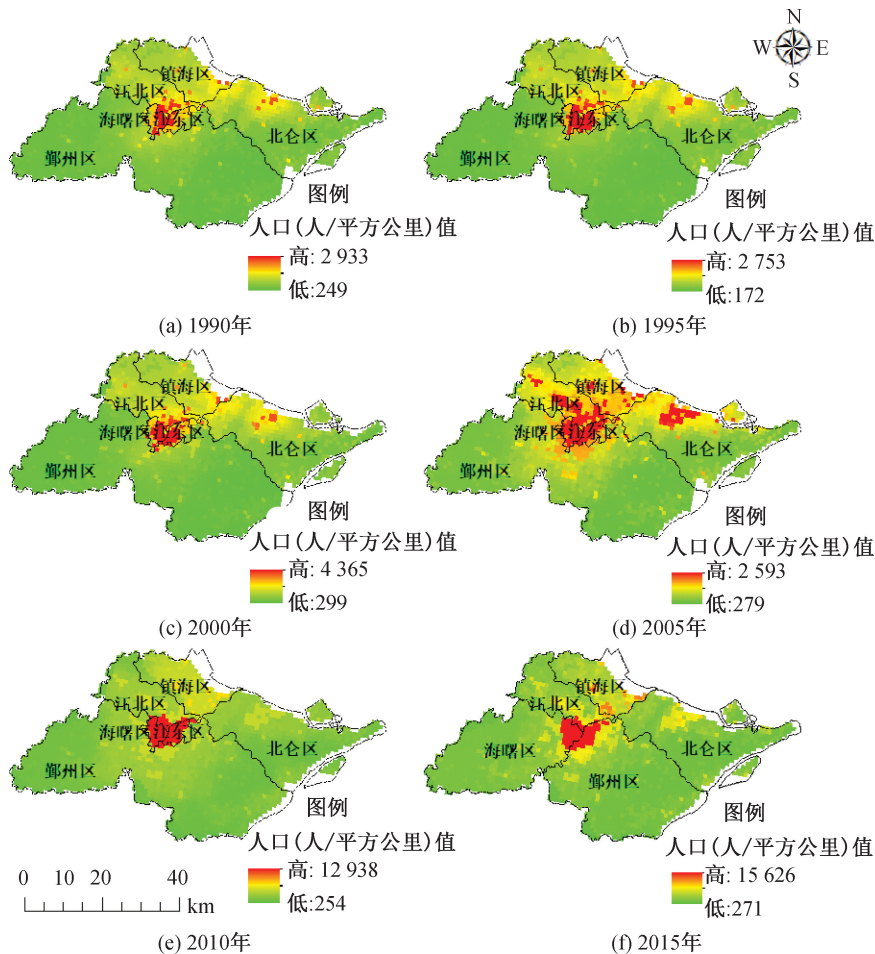


图 6 1990—2015 年宁波市中心城区人口空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of population in the central urban area of Ningbo from 1990 to 2015

表 6 地表温度与人口空间分布相关性
Tab. 6 Correlation between land surface temperature and spatial distribution of population

人口规模					
1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
0.33	0.40	0.51	0.56	0.52	0.36

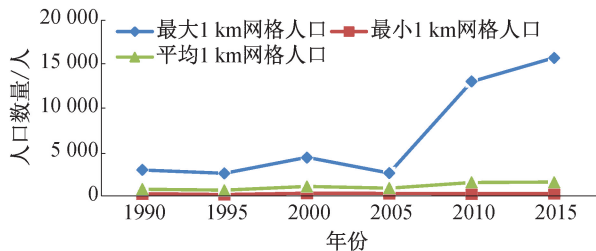


图 7 1990—2015 年 1 km 网格人口变化

Fig. 7 Population change of 1 km grid from 1990 to 2015

从图 8 中可以发现,2005—2010 年,宁波市中心城区 GDP 处于下滑状态,其主要原因是 2008 年的金融危机所带来的持续性影响。当时我国虽然没有在金融上遭受严重冲击,但全球金融危机及经济衰退的影响对我国的冲击和考验也是严峻

的。在全球经济一体化和国际分工高度化,中国长期以来用外需来支持经济的发展模式等,都导致了中国在当时的债务水平激增,经济增长处于弛缓状态。2010—2015 年,宁波市中心城区 GDP 持续上升,经济发展速度加快,经济水平整体呈上行状态,其主要原因是驱动经济增长的要素,已逐渐从传统的劳动与资源密集型,升级成以人才流入、科技创新、消费升级为导向的“高质量发展”。宁波市中心城区不断转型升级的制造业,是经济茁壮生长的基石。2015 年,宁波市中心城区 GDP 产值已经超过了 2005 至 2010 年下滑前,2005 年的 GDP 产值,达到了 19 679.68 万元/km² 的水平。这表明了宁波市中心城区的经济发展正在逐渐向技术驱动型转变。随着环杭州湾大湾区的建设,宁波市发展将迎来更大挑战,城市发展应当优先发展高新技术行业,发挥港口的优势,加快贸易往来,促进经济发展的同时保护生态环境,为城市生活营造良好环境。

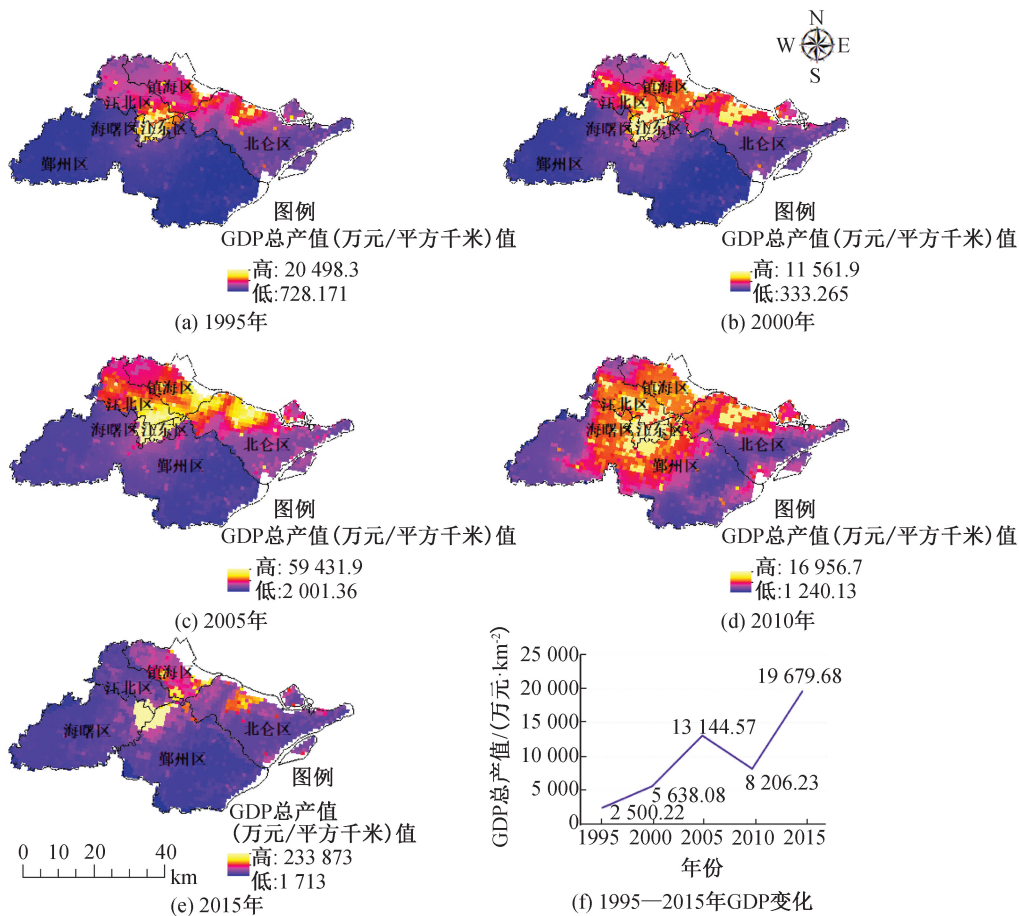


图 8 1995—2015 年 GDP 空间分布和平均 GDP 总产值变化

Fig. 8 Spatial distribution of GDP and change of average GDP from 1995 to 2015

表 7 地表温度与 GDP 空间分布相关性

Tab. 7 Correlation between surface temperature and spatial distribution of GDP

		GDP		
1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
0.33	0.47	0.52	0.62	0.36

3 结论

本文尝试利用宁波市 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI/TIRS 数据,进行温度反演及其影响因素的相关性分析,主要的研究结果如下,1990—2015 年宁波市中心城区热岛效应逐渐增强,中强热岛和极强热岛面积逐渐增多,宁波市中心城区热岛效应经历了由单中心走向多中心、高速发展到缓慢增长的历程;影响因素分析表明,热岛效应与 NDVI 和 NDBI 和人口规模布局息息相关,植被对于热岛效应起到一定程度缓解作用,而建筑密度增加会增强热岛效应,人口和 GDP 也是热岛效应的驱动因素。

研究采用单窗算法进行地表温度反演,虽然对于 TM 数据而言反演精度高,有利于从宏观角度把握变化规律,但基于单窗算法的地表温度反演依赖气象数据,从而会影响较极端或严重污染情况下的温度反演精度,今后可考虑对宁波—杭州—上海,乃至环杭州湾大湾区的更长时间序列的 Landsat 8 数据进行深入分析,以提高结论的准确性和代表性。

参考文献:

- [1] 王中正. 基于遥感影像的城市热岛效应研究及系统的设计[D]. 海口:海南大学,2018.
- [2] 彭少麟,周凯,叶有华,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 生态环境,2005,14(4):574-579.
- [3] LI D, BOU-ZEID E. Synergistic Interactions Between Urban Heat Islands and Heat Waves: the IMPact in Cities Is Larger Than the Sum of Its Parts[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(9):2051-2064.
- [4] RAO. Remote Sensing of Urban Heat Islands From an Environmental Satellite[J]. American Meteorological Society, 1972, 53(7):647-678.
- [5] 叶钰,秦建新,胡顺石. 长沙市热岛效应时空特征变化研究[J]. 地球信息科学学报,2017,19(4):518-527.
- [6] 王琳,徐涵秋. 快速城市化下福州市的热环境变迁[J]. 同济大学学报:自然科学版,2017,45(9):1336-1344.
- [7] 杨智威,陈颖彪,吴志峰,等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J]. 资源科学,2019,41(6):1154-1166.
- [8] 敖翔宇,谈建国,支星,等. 上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子[J]. 地理学报,2019,74(9):1789-1802.
- [9] 樊超,桂峰,赵晟. 舟山本岛城市热岛安全度分析[J]. 海洋科学,2019,43(10):134-141.
- [10] 徐洪,杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(6):790-798.
- [11] 杨浩,孟娜,王婧,等. 基于支持向量机的京津冀城市群热环境时空形态模拟[J]. 地球信息科学学报,2019,21(2):190-200.
- [12] 郭继强,潘洁. 基于 CA-Markov 模型的南京市热环境格局演变及预测分析[J]. 大气与环境光学学报,2020,15(2):143-153.
- [13] 历华,柳钦火,邹杰. 基于 MODIS 数据的长株潭地区 NDBI 和 NDVI 与地表温度的关系研究[J]. 地理科学,2009,29(2):262-267.
- [14] 李学敏,文力,王俪璇. 基于 Landsat 遥感数据的城市热岛效应及影响因素——以襄阳市为例[J]. 湖北农业科学,2019,58(16):41-48.
- [15] 吴宜进,赵行双,奚悦,等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报,2019,74(7):1438-1449.
- [16] 姚一舟,陈伟,徐悦,等. 宁波市城市热岛效应研究[J]. 浙江林业科技,2013,33(5):10-18.
- [17] 丁焯毅,陈有利,黄鹤楼. 宁波市城市热岛效应特征分析[J]. 浙江气象,2008,29(4):28-31.
- [18] 覃志豪, ZHANG Minghua, ARNON Karnieli, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报,2001,04(4):456-466.
- [19] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等. 单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报,2015,19(6):964-976.
- [20] QIN Z, KARNIELI A, BERLINER P. A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature From Landsat Tm Data and Its Application to the Israel-egypt Border Region[J]. Taylor & Francis, 2001, 22(18):3719-3746.
- [21] 章明. 基于 Spot Vegetation 的海南岛植被类型 NDVI 变化特征研究[D]. 重庆:西南大学,2009.
- [22] LIU H, ZHAN Q, YANG C, et al. The Multi-timescale Temporal Patterns and Dynamics of Land Surface Temperature Using Ensemble Empirical Mode Decomposition[J]. Elsevier B. v., 2019, 652: 243-255.
- [23] 赵颜创,赵小锋,旷达. 宁波城市热岛随城市化演变的多指标综合分析[J]. 生态环境学报,2014,23(10):1628-1635.

(责任编辑 王利君)